基于硅光子学的光学相控阵的开发、校准与表征

Sylvain Guerber[a]、Daivid Fowler[a]、Ismael Charlet[a,b]、Philippe Grosse[a]、Kim Abdoul-Carime[a]、Jonathan Faugier-Tovar[a]和 Bertrand Szelag[a] [a] CEA、LETI、MINATEC园区、CEA-Grenoble，F-38054 格勒诺布尔，法国 [b] 意法半导体，850 rue Jean Monnet，38920 Crolles，法国

摘要

过去十年间，光学相控阵（OPA）得到了广泛研究，目标应用包括激光探测与测距（LiDAR）系统、全息显示、大气监测和自由空间通信。借助硅光子学平台的成熟发展，通常采用的机械式光束转向系统有望由集成光学相控阵取代，从而大幅降低激光雷达的成本和尺寸，并通过固态光束转向提升其性能（扫描速度、功率效率、分辨率等）。然而，要实现满足激光雷达系统规格要求（低发散角和单输出光束）的光学相控阵并非易事。为实现完整的激光雷达系统，CEA LETI 对开发高性能光学相控阵所面临的技术挑战进行了研究。具体而言，研究人员开发了高效的遗传算法，用于校准高通道数光学相控阵，并搭建了先进的测量装置，以支持晶圆级光学相控阵表征。

关键词：硅光子学、光学相控阵（OPA）、激光探测与测距（激光雷达）、遗传算法

1. 引言

在自动驾驶汽车即将大规模投入应用的推动下，近年来，激光雷达（激光探测与测距）系统受到越来越多的关注。事实上，与雷达或摄像机等其他三维成像技术相比，激光雷达系统具有更远的探测距离、更高的角分辨率，且对环境条件的敏感度大幅降低。然而，目前的激光雷达传感器通常依赖笨重、缓慢、耗电且昂贵的机械式光束转向机构，这阻碍了该技术的大规模应用。近期，有人提出了一种基于光学相控阵（OPA）的新方案[1-4]。借助硅光子学平台的成熟技术，传统的机械式光束转向系统有望由集成式芯片级光学相控阵取代。这将显著减小激光雷达系统的体积和成本，并凭借固态光束转向提升其性能（扫描速度、功率效率、分辨率.....）。因此，高性能光学相控阵的开发将为低成本激光雷达系统的实现铺平道路，应用于汽车领域 [5] ，以及自由空间通信 [6], 、全息显示 [7] 和生物医学成像 [8]。

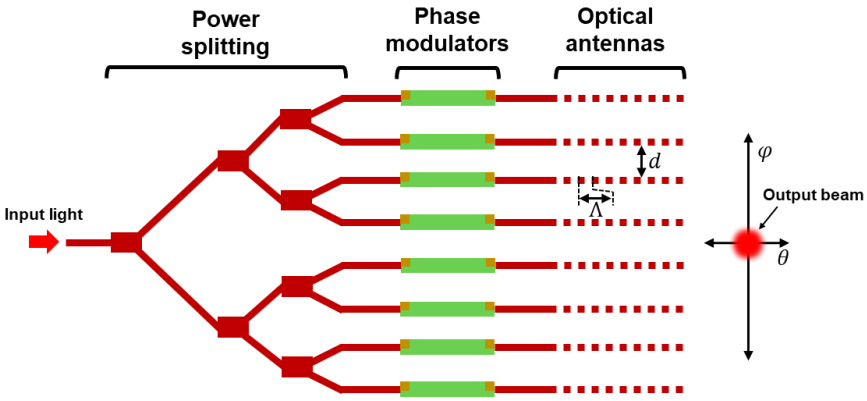

图1，光学相控阵示意图。

图1展示了光学相控阵的示意图。首先，激光耦合进入光子芯片中的一条波导。随后，通过由一系列多模干涉仪（MMI）构成的分光树，可用光功率（理想情况下）均匀分配到多条波导中。接着，每条波导都连接到一个由衍射光栅构成的光学天线。输出干涉图样取决于各天线之间的相位关系，而相位调制器可以对其进行调节。

高分辨率激光雷达系统的一个重要参数是所产生输出光束的发散角 φ_{3dB} (°)，其应足够小，以满足系统的分辨率要求。对于基于光学相控阵的激光雷达，该参数由工作波长 λ (nm)、光学天线的数量 N 和间距 d (nm) 决定，如公式 (1) 所示。

$$\varphi_{3dB} = \frac{70\lambda}{Nd} \tag{1}$$

由于需要较大的光学孔径才能产生低发散角的光束，因此较高的通道数和较大的天线间距更为理想。然而，假设光学相控阵（OPA）的通道间距均匀，则发射光的干涉图样将呈现多个衍射级次，其角距离取决于天线间距 d，如公式（2）所示。

$$\sin(\Delta\varphi) = \frac{\lambda}{d} \tag{2}$$

因此，为了消除那些会限制光学相控阵无模糊视场（FOV）的非期望高阶旁瓣，天线间距应保持较小。已有研究提出采用非周期性天线间距的光学相控阵，在保持较大天线间距的同时抑制高阶旁瓣 [9]。虽然这确实能够扩大视场，但在平均天线间距相同的情况下，主瓣功率占比并不会改善，因为原本通常包含在高阶旁瓣中的功率会均匀分布到噪声底上。因此，这种方法固有的较大光学损耗，使其不适用于远距离激光雷达；远距离激光雷达要求主光束中具有大量光功率。如图2所示，要获得低发散角的光束和宽视场，光学相控阵必须包含大量间距紧密的天线。因此，单个光学相控阵中的光学天线数量多年来显著增加 [4]。

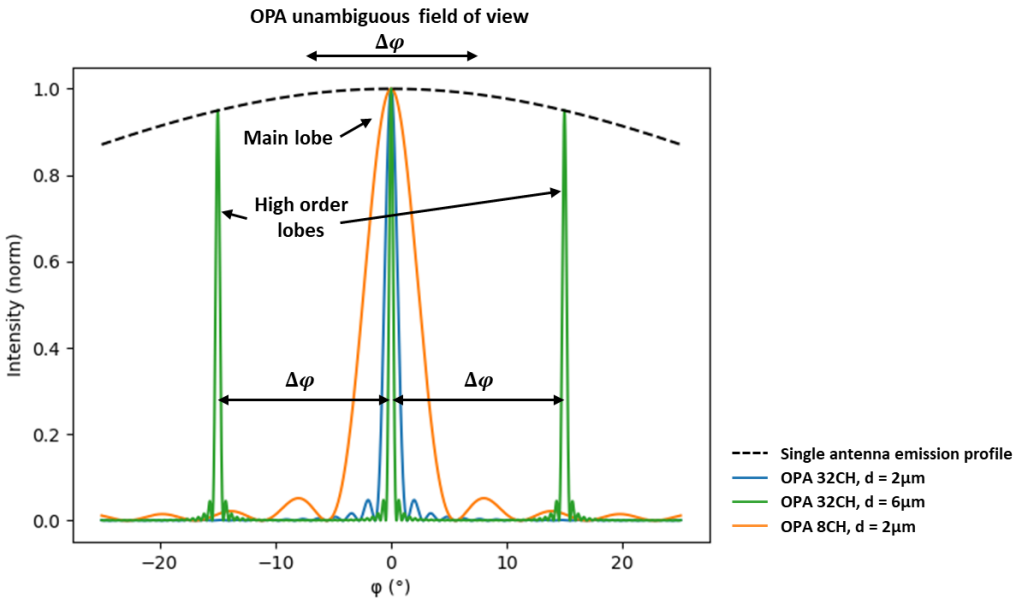

图2，不同通道数和天线间距配置下的光学相控阵分析仿真（λ=1550nm）

如上所述，光学相控阵的发射方向图取决于光学天线之间的相位关系。为了在 φ 方向上的特定角度产生形状最佳的光束，必须在天线之间施加线性相位梯度 ψ，如方程（3）所述。

$$\sin(\varphi) = \frac{\psi\lambda}{2\pi d} \tag{3}$$

因此，对于采用等长波导设计的光学相控阵（OPA），在不施加相位调制的情况下，应获得一个居中（φ = 0°）且形状良好的输出光斑。然而，由于制造过程中固有的波导缺陷（表面粗糙度、尺寸偏差等），每个 OPA 通道的设计光程与实际制造的光程之间会存在差异，从而导致输出光束质量较差。幸运的是，可利用原本用于光束转向的相位调制器来补偿这些相位误差。然而，由于相位误差具有随机性，必须对所有 OPA 通道进行校准。对于包含大量光学通道的 OPA，必须采用高效算法来缩短 OPA 的校准时间。此外，为了便于 OPA 的开发与制造，必须快速完成这一校准过程，并在晶圆级进行校准。

本文的组织结构如下：第 2 节比较两种校准算法。第 3 节介绍我们的晶圆级光学相控阵表征装置。随后，利用所提出的算法和表征装置驱动一个 16 通道光学相控阵，相关结果见第 4 节。最后，第 5 节给出简要讨论和结论。

2. 光学相控阵校准

为了对光学相控阵（OPA）进行校准，需要两个主要要素：一种优化算法，以及一个需要最大化（或最小化）的品质因数（FOM）。在本研究中，品质因数定义为 OPA 远场与一个以指定输出角度为中心的高斯光束之间的重叠积分，如图 3(a) 所示。OPA 校准中最常用的算法可能是爬山算法类型 [10]。这种确定性算法的原理如图 3(b) 所示。每次选择一个光学通道，逐步将该通道的相位从 0 变化至 2π。对于每一个可能的相位值，都会计算相应的品质因数。测试完所有数值后，选择能够提供最高品质因数的相位值，然后算法切换到下一个天线，直到所有天线都完成优化。为了使品质因数逐渐收敛，这一过程可以重复执行数次。爬山算法相对容易实现和使用，因为它没有可调参数。然而，正如本节下文将详细介绍的那样，校准

持续时间不会随着通道数和相位离散级数的增加而良好扩展。因此，针对高通道数光学相控阵，还探索了另一种方案。

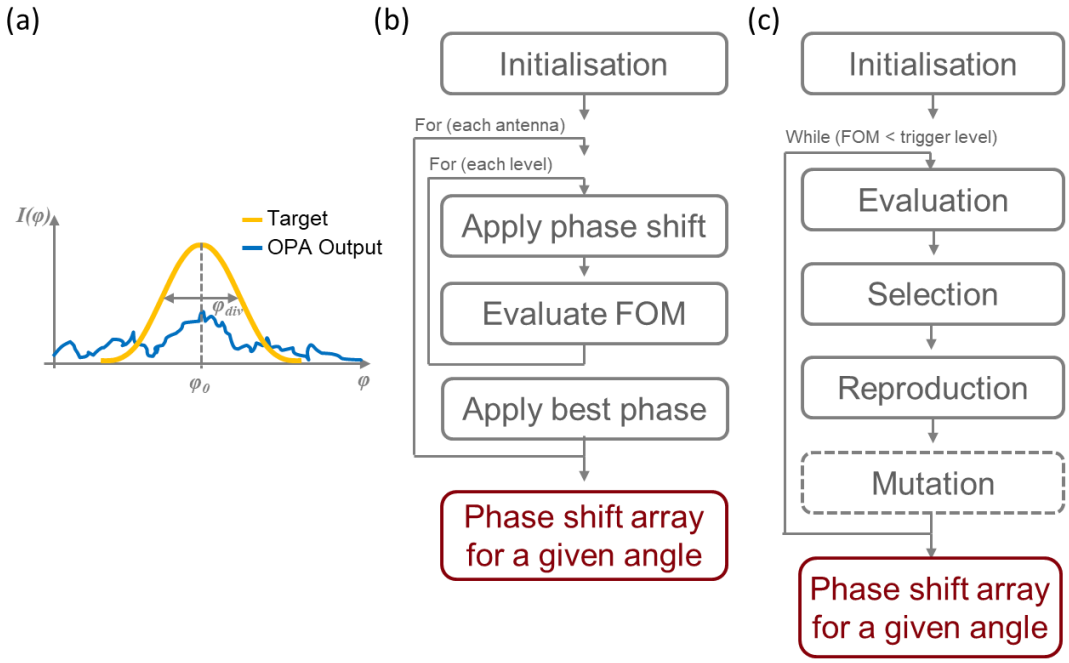

图 3，（a）用于计算评价指标的光学相控阵输出目标示意图。（b）爬山算法和（c）遗传算法的流程 .

遗传算法的工作原理直接受到查尔斯·达尔文进化论的启发。图 3(c) 展示了其概要。首先，在初始化过程中生成一组个体，每个个体由 N 个基因组成（N 为光学相控阵的通道数）。每个基因代表一个光学相控阵通道的相位。随后计算每个个体的评价指标（评估）。然后，根据评价指标选出一组个体。可采用多种选择机制：

- 排名：选出评价指标最佳的个体，再选出第二佳的个体.....依此类推，直到选出一定数量（选择率）的个体。- 锦标赛：随机选出两个个体，并保留评价指标较佳的个体。重复此过程，直到选出一定数量（选择率）的个体。- 幸运转盘：将个体表示在转盘上，每个个体所占的扇形角度与其评价指标成正比。随机选取一个角度，并选出对应的个体。评价指标越高，被选中的概率越大。重复此过程，直到选出一定数量（选择率）的个体。

根据所要解决的问题，某种方法可能比另一种方法更有效。在我们的案例中，仅测试了排序法。选出一组个体后，便开始繁殖。选取两个个体（父代），生成一个新个体。新个体（子代）的每个基因都随机取自其中一个父代。在这一过程中可能发生变异。对于给定的变异率，子代的部分基因会略有变化。新的基因值会在一定范围（变异强度）内围绕其初始值随机选取。重复这一过程，直到种群规模恢复到初始水平（选择前）。随后，在这一新一代种群中重复整个过程（评估、选择、繁殖、变异）。与爬山算法相比，遗传算法由于参数众多（种群规模、选择率、变异率、变异强度），实现起来困难得多，使用也更复杂。不过，正如下文所述，如果校准得当，它们会非常强大。

在众多评价指标中，算法的收敛速度是一项重要指标。它通过找到最优值或达到某一收敛水平所需的评价指标评估次数来衡量。为了评估所提出的校准算法的收敛速度，我们建立了一个基于一维光栅模型的解析模型

[11]。该模型以光学相控阵参数（Δφ、N、d、λ、单天线辐射轮廓）作为输入，可以快速计算光学相控阵远场的理论值。我们使用该模型测试和开发光学相控阵校准算法。图2展示了一个示例。对于具有随机初始相位值的光学相控阵，我们将两个算法都应用于一个定义为以0°为中心的高斯函数的目标。利用上述解析模型计算光学相控阵的远场，结果如图4所示。首先，我们考虑了一个包含256根天线的光学相控阵，其相位调制器由4位数模转换器驱动，对应于0到2π之间的16个相位离散级数。如图4(a)所示，对于这一配置，两个算法表现出非常相近的收敛速度。爬山算法在第4096次（256*16）评价附近出现的不连续，对应于第一个优化周期结束（每个通道均已优化一次）；此处共运行了两个完整的优化周期。然而，如果将离散级数增加到256（8位数模转换器），如图4(b)所示，或增加到4095（12位数模转换器），如图4(c)所示，两个算法之间的收敛速度便会出现明显差异。这是由于爬山算法具有确定性。实际上，该算法会系统地探索每个通道的所有可能相位值，这一过程极其耗时。因此，离散级数的增加会导致评价指标的评价次数大幅增加。显然，增加通道数量时也会观察到相同的行为。相比之下，遗传算法对解空间规模增大的敏感性要低得多，因为它花费较少时间评估次优解。因此，对于通道数量较多的光学相控阵，遗传算法能够实现高得多的收敛速度。此外，遗传算法在寻找最优解方面也更加可靠。图4(d)展示了一个具有128个通道、相位离散级数为128的光学相控阵的优化过程。每种算法均使用不同的初始随机相位分布运行了五次。可以看出，遗传算法得到的评价指标值相对一致。作为一种确定性算法，爬山算法极度依赖初始相位分布。因此，每次优化找到的最优值都会有显著差异。

因此，遗传算法似乎非常适用于光学相控阵校准；本稿第 5 节介绍的基于硅的 16 通道光学相控阵已采用该算法进行校准。

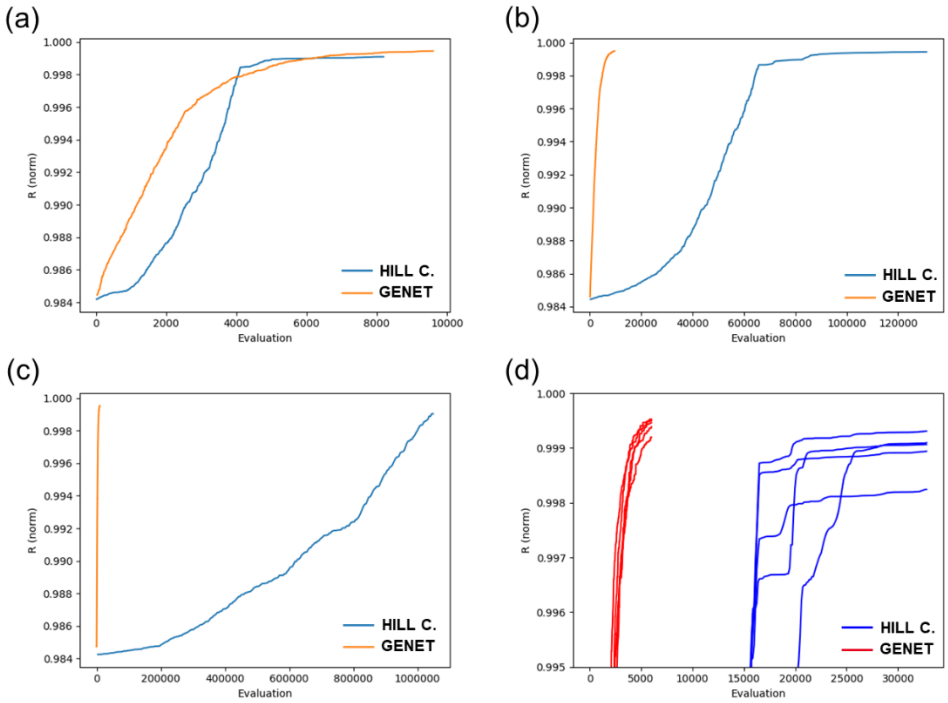

图4，256通道光学相控阵的品质因数 R 随评估次数的变化：（a）16、（b）256、（c）4096 个相位离散级数，分别采用爬山算法和遗传算法。比较采用128个相位离散级数的128通道光学相控阵中爬山算法与遗传算法的收敛效率。

3. 表征装置

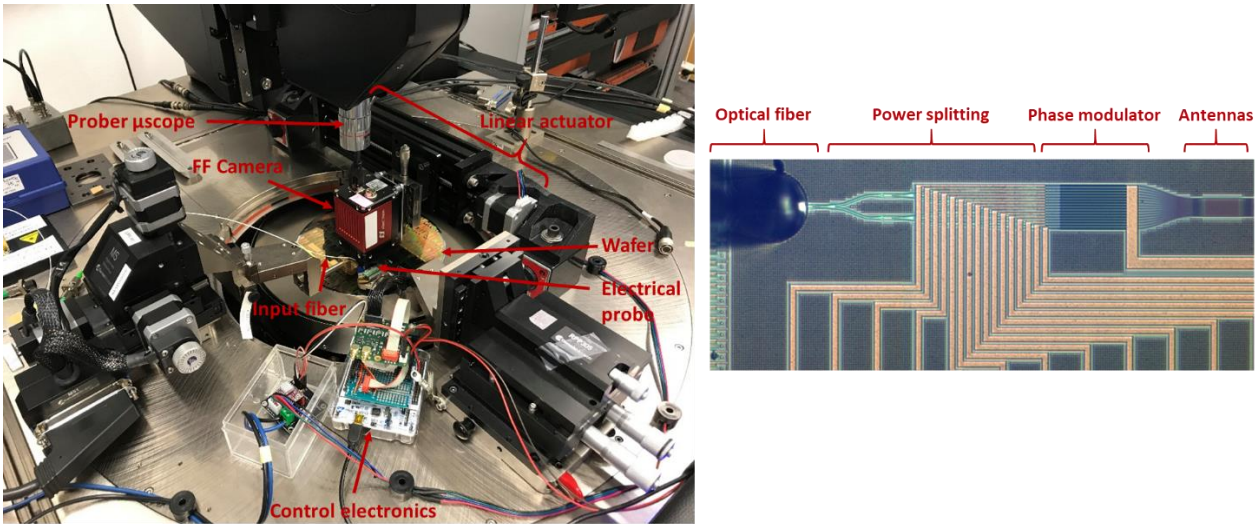

图5，晶圆级光学相控阵表征台概览。16通道硅基OPA的显微镜视图。

如上一节所述，光学相控阵的校准并非易事，可能需要耗费大量时间。事实上，对单个光学相控阵需要进行多个校准周期，因为每个角度值都需要单独优化。此外，在环境温度下进行的校准，在温度发生变化时可能不再有效，因为温度变化会影响光在光学相控阵波导中传播时的光相位。因此，面向汽车应用的光学相控阵可能需要根据激光雷达的工作温度范围和光学相控阵温度敏感性，使用多张校准表。

因此，基于光学相控阵的激光雷达需要快速、高效的表征系统。传统上，电子和光子器件的高速测试在晶圆级进行。自动探针台（探针台）用于测试晶圆上不同裸片的多个电路。在此背景下，我们开发了一套基于探针台的晶圆级光学相控阵表征台，图5展示了其照片。光子晶圆（直径最大可达300 mm）装载在探针台上。将一根光纤与光学相控阵的输入光栅耦合器对准，以便将激光注入电路。使用多通道电探针同时接触光学相控阵的所有相位调制器。为了表征、校准和驱动光学相控阵，必须对其远场成像。通常使用相机和一组光学透镜[10] 来实现，从而获得较大的视场。然而，由于探针台上的可用空间有限，无法使用大型光学系统。因此，我们选择将光学相控阵的远场直接成像到相机的焦平面上[12, 13]。这种方法效果良好，但由于相机传感器尺寸较小，且晶圆与相机之间的距离很短（几厘米），该装置的视场仅有几度。为克服这一限制，我们引入了一个直线执行器，可沿φ方向滑动相机，如图5所示。位移由蜗杆传动和步进电机精确控制。使用该系统，相机可以在φ 方向上居中于任意角度。此外，如图6(a)所示，将相机按等于传感器尺寸的步长移动并拼接图像，即可获得大视场全景图像。

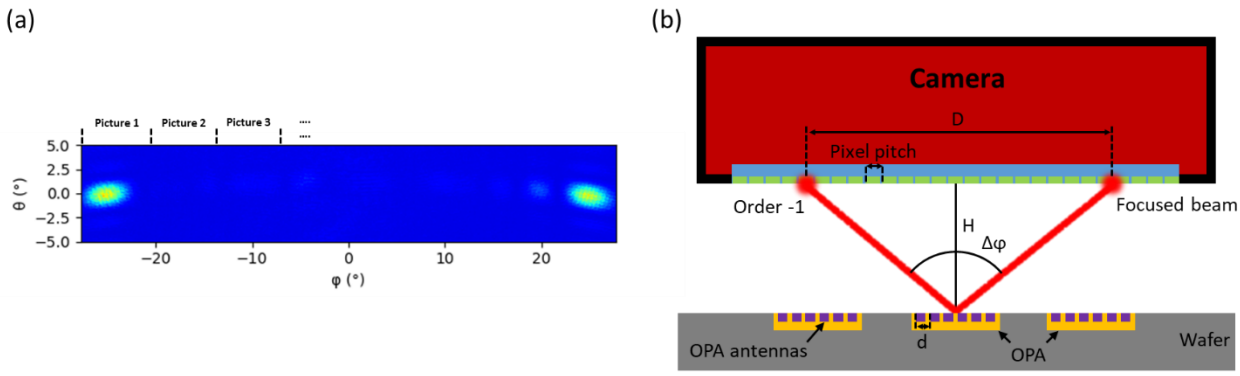

图6，（a）光学相控阵远场的全景图像。（b）ben 的角度校准原理 ch.

为了在相机上建立角度刻度（°/像素），必须对装置进行校准。校准流程如图6(b)所示。首先，根据相机像素间距，并通过手动测量相机与晶圆表面之间的距离H，对角度刻度进行粗略估算。然后，根据光学相控阵参数和公式（2）计算光学相控阵相邻两个衍射级次之间的角距离。对于天线间距为2μm、工作波长为1550nm的光学相控阵，该角距离为$\Delta\varphi = 50.8°$。随后对光学相控阵进行校准，使其在$\Delta\varphi/2$处产生光束。如图6(a)所示，在$-\Delta\varphi/2$处会产生一个二级旁瓣。接着，通过用高斯曲线拟合光束，测量两个旁瓣之间的像素数。由此即可得到精确的角度刻度（°/像素）。然而，由于这一过程只能提供相对角度，仍需确定绝对垂直角度原点。假设在$\varphi = 0°$处应获得功率最高的光束，则可通过在不同角度进行多次校准并监测光束功率来确定绝对原点。另一种方法是找到使主瓣与二级旁瓣功率相等的角度φ。这样，绝对原点便位于两个光束之间。

4. 16通道光学相控阵表征

作为演示，我们使用校准算法和表征平台驱动了一款基于硅的16通道光学相控阵，其工作波长为$\lambda = 1550$ nm，天线间距为2μm。首先，对由波导和天线组成的测试结构进行表征，以测量单天线的发射方向图（阵因子）。结果如图7(a)所示。将该方向图绘制为一维图，如图7(b)所示，可以看到发射方向图中对应于正弦基函数的两个旁瓣。这将有助于精确校准光学相控阵，因为特定角度下光束可达到的最大光功率由该包络函数决定。

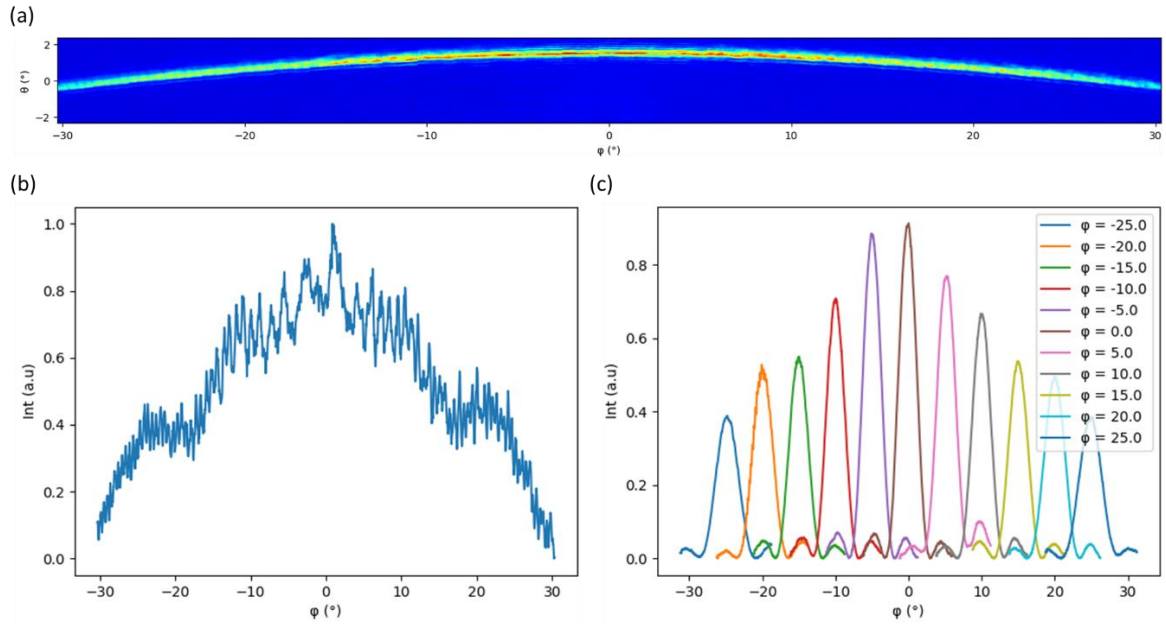

图7，（a）单天线发射方向图的全景图像：（a）二维和（b）一维。（c）对16通道光学相控阵在 -25° 至 +25° 范围内进行校准，步进为5°。

现在可以对光学相控阵进行校准。使用直线执行器将相机对准所需的输出光束角φ。然后，使用开发的遗传算法，根据给定的品质因数优化光束；该品质因数定义为以φ为中心的高斯函数。对光学相控阵的每个目标输出角度重复此过程。如图7(c)所示，光学相控阵已在-25°至+25°范围内完成校准，步进为5°。正如预期，光束包络与单天线辐射轮廓一致。

5. 结论

借助硅光子学平台的成熟技术，传统的机械式光束转向系统可由集成光学相控阵取代；得益于固态光束转向，激光雷达的成本和尺寸可显著降低，同时扫描速度、功率效率和分辨率等性能也得到提升。然而，要实现符合激光雷达系统规格（低发散角和单输出光束）的光学相控阵并非易事。此外，要实现基于光学相控阵的激光雷达大规模生产，必须具备高效的表征系统。为应对这些挑战，我们开发了用于校准高通道数光学相控阵的遗传算法，以及兼容晶圆级光学相控阵表征的先进表征装置。

致谢

本研究部分经费由法国国家研究署通过卡诺资助、ECSEL Vizta欧洲项目以及法国国家计划“未来投资计划，IRT Nanoelec，编号 ANR-10-AIRT-05”提供。

© 作者。由 SPIE 根据知识共享署名4.0国际许可协议出版。分发或复制本作品的全部或部分内容，必须

参考文献

[1] J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E. Shah Hosseini, and M. R. Watts, 《大规模纳米光子相控阵》, 《自然》, 195-199（2013）。[2] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágerská, N. Le Thomas, R. Houdré, and R. Baets, 《基于绝缘体上硅的一维光学相控阵实现片外光束转向》, 《光学快报》, 1477 - 1479（2009）。 [3] A. Yaacobi, J. Sun, M. Moresco, G. Leake, D. Coolbaugh, and M. R. Watts, 《用于宽角度光束转向的集成式相控阵》, 《光学快报》, 4575-4578（2014）。 [4] X. Sun, L. Zhang, Q. Zhang and W. Zhang, 《面向实用激光雷达解决方案的硅光子学》, MDPI《应用科学》, （2019）。[5] S. Won Chung, H. Abediasl, and H. Hashemi, 《基于绝缘体上硅互补金属氧化物半导体的单片集成大规模光学相控阵》, 《IEEE固态电路学报》, 275-296（2018）。 [6] B. Guan, R. P. Scott, C. Qin, N. K. Fontaine, T. Su, C. Ferrari, M. Cappuzzo, F. Klemens, B. Keller, M. Earnshaw, and S. J. B. Yoo, 《利用混合三维光子集成电路，通过轨道角动量复用/解复用实现自由空间相干光通信》, 《光学快报：快讯》, 145-156（2014）。 [7] C. V. Poulton, M. J. Byrd, M. Raval, Z. Su, N. Li, E. Timurdogan, D. Coolbaugh, D. Vermeulen, and M. R. Watts, 《红外和可见光波长下的大规模氮化硅纳米光子相控阵》, 《光学快报》, 21- 24（2017）。[8] A. Mohanty, Q. Li, M. Amin Tadayon, G. Bhatt, E. Shim, X. Ji, J. Cardenas, S. A. Miller, A. Kepecs, M. Lipson, 《用于亚毫秒级深部脑神经刺激的可重构纳米光子学平台》, arXiv, 2018。 [9] M. Chul Shin, A. Mohanty, K. Watson, G. R. Bhatt, C. T. Phare, S. A. Miller, M. Zadka, Brian S. Lee, X. Ji, I. Datta, and M. Lipson, 《芯片级蓝光相控阵》, 《光学快报》, 1934-1937（2020）。 [10] J. C. Hulme, J. K. Doylend, M. J. R. Heck, J. D. Peters, M. L. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, 《完全集成的混合硅二维光束扫描器》, 《光学快报：快讯》, 5861-5874（2015）。 [11] S. Pathak, 《基于硅纳米光子学的阵列波导光栅》, 博士论文, 根特大学（2014）。 [12] N. A. Tyler, D. Fowler, S. Malhouitre, S. Garcia, P. Grosse, W. Rabaud, and B. Szelag, 《用于单一近红外波长下二维光束转向的氮化硅集成光学相控阵》, 《光学快报：快讯》, 5851- 5858（2019）。[13] N. A. Tyler, S. Guerber, D. Fowler, S. Malhouitre, P. Grosse, and B. Szelag, 《在晶圆级测试平台上表征氮化硅集成光学相控阵》, 《可视化实验杂志》（Jove）, 2020。